



50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

**Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering**

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

O. Wazan

Rechnergestütztes Finden von Koppelmechanismen für Geradföhrungen

1. Einleitung

Die Erzeugung von Geradföhrungen durch einfache Koppelmechanismen (sog. Lenkergeradföhrungen) ist in der Technik nach wie vor eine aktuelle und anspruchsvolle Aufgabe. Für den Anwender ist die Auswahl geeigneter Strukturen und Verfahren aus der Vielzahl verstreut angebotener Möglichkeiten aber oft nicht einfach.

Im vorliegenden Beitrag werden deshalb die aus der Fachliteratur bekannten Mechanismen und Synthesemethoden überblicksmäßig zusammengestellt und mit Bezug auf eine einheitliche Länge der Geradföhrung hinsichtlich Bahnabweichung und Bauraum vergleichend bewertet. Neben der Sammlung und Bewertung bekannter Lösungen wird das rechnerunterstützte systematische Finden weiterer Prinziplösungen für Punktgeradföhrungen bei beliebiger Annahme der Grundabmessungen von Viergelenkmechanismen demonstriert.

Die Berechnung und Darstellung der möglichen Getriebevarianten mit Hilfe des Satzes von Roberts/ Tschebyshev für Punkt- und Ebenenföhrungen durch vier-, fünf- und sechsgliedrige Koppelgetriebe ausgehend von viergliedrigen Koppelmechanismen werden durch einen speziell dafür entwickelten Programmbaustein rechentechnisch realisiert.

2. Grundlegende Begriffe und Definitionen

Im Folgenden werden einige grundlegende Dinge kurz erläutert, die zum besseren Verständnis der Bahnabweichung der Geradföhrung und des Bauraums eines Föhrungsmechanismus notwendig sind.

- **Definition der Bahnabweichung**

Zur Beurteilung und Auswahl von Geradföhrungsgetrieben sind in der VDI 2740 [VDI02] allgemeine und entsprechend der Aufgabenstellung spezifische Kennwerte festgelegt (Abb. 1),

- entweder bei der Konstruktion sofort mitberücksichtigt werden
- oder erst nachträglich durch maßstäbliche Veränderung des gefundenen Getriebes erzeugt werden.

Die Länge l_G wird durch die Punkte K_A und K_E auf der Koppelpunktbahn k_K begrenzt. Die Festlegung dieser Punkte ist in gewissen Grenzen beliebig und wird folgendermaßen vorgenommen:

- bei symmetrischen Koppelpunktbahnen ergeben sich die Punkte K_A und K_E zum Beispiel in den Umkehrpunkten der Bahn k_K (siehe Abb. 2a), also in den Punkten mit einer vertikalen Tangente an diese Bahn. Nach Abb. 3 kann man die Geradföhrung auch durch zeichnen einer Parallelen zur Tangente g im Bezugspunkt K_M definieren. Die Parallele schneidet die Bahn in den zwei Punkten K_A und K_E , deren Abstand gleich der Länge l_G sein muss.
- Bei unsymmetrischen Koppelpunktbahnen k_K (Abb. 2b) genügt es mit nur einem Umkehrpunkt zu arbeiten und die ideale Gerade l_G als Parallele zur horizontalen Bahntangente an die Föhrungsbahn durch diesen Punkt oder auch einen geeigneten anderen Punkt festzulegen.

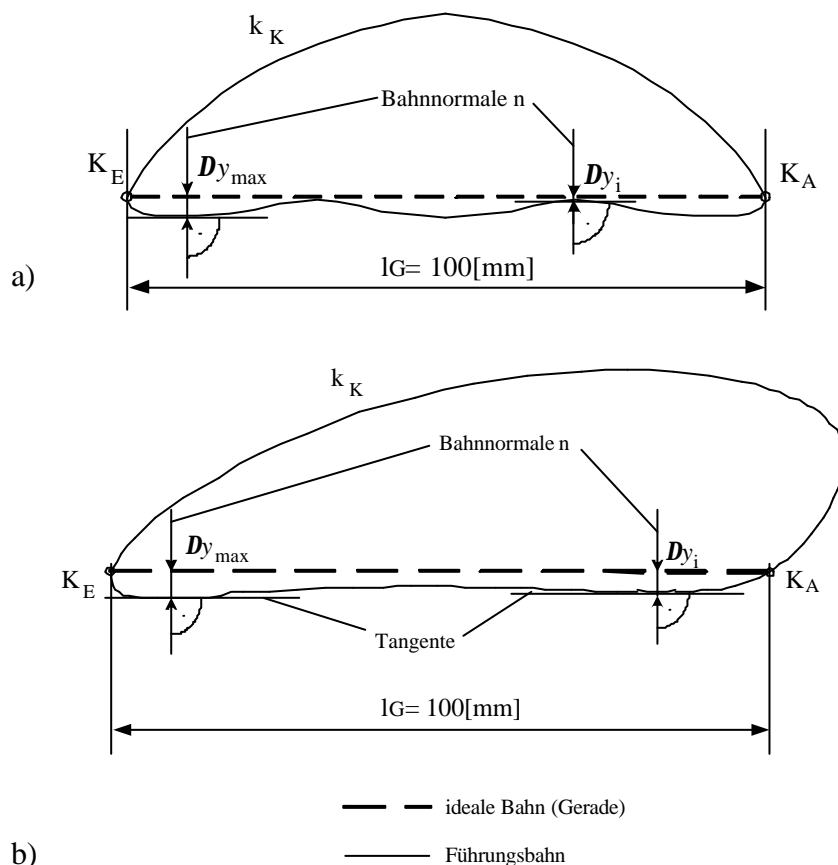


Abb. 2: Definition der Geradföhrungslänge l_G einer Punktgeradföhrung

a) symmetrische Koppelpunktbahn b) unsymmetrische Koppelpunktbahn

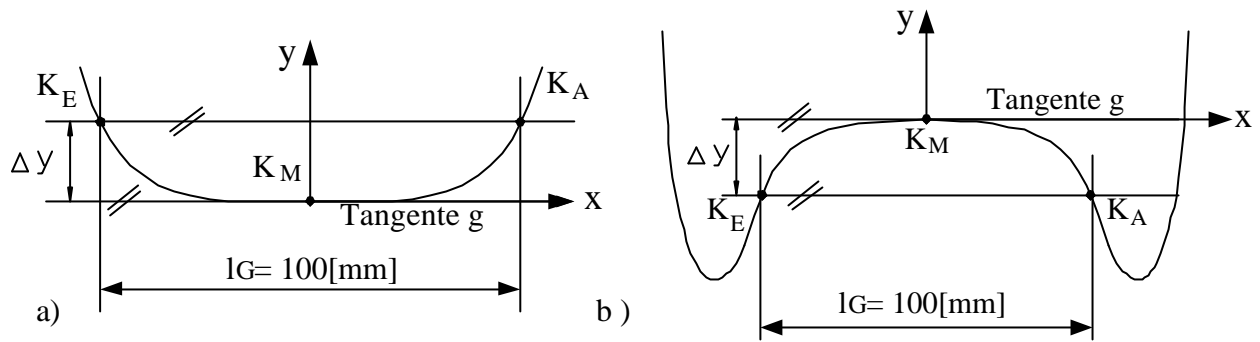


Abb. 3: Definition der bezogenen Geradföhrungsabweichung Dy/l_G nach [VDI02]

- a) ohne Überspringen
- b) mit Überspringen

Prinzipiell ist die Betrachtung jener Punkte erforderlich, in denen die Koppelpunktbahn für horizontal liegende Geradföhrungen eine waagerechte Tangente hat. Die Bahnabweichung ist dann durch die Breite eines Toleranzbandes Dy nach Abb. 3 gegeben.

Bemerkung:

Für Vergleichszwecke sind die Getriebe nach der Ermittlung mit dem Programm AUTOCAD gedreht und verschoben dargestellt, damit alle Geradföhrungen horizontal liegen.

• Definition des Bauraumes

In der Arbeit wird der Bauraum nach Abb. 4 wie folgt definiert:

Der Bauraum stellt in der Regel eine Rechteckfläche dar. In dieser Fläche müssen alle Getriebestellungen zur Erzeugung des geradlinigen Abschnitts der Koppelpunktbahn einschließlich dieses Bahnabschnitts liegen. Diese Fläche stellt den tatsächlich erforderlichen rechteckigen Bauraum bzw. die Arbeitsfläche $A_R = x.y$ dar.

Zur besseren Vergleichbarkeit des Bauraumes unterschiedlicher Mechanismen wird die vorhandene Arbeitsfläche A_R durch eine gleich große Fläche $A_V = a.b$ ersetzt, wobei eine Seitenlänge $a = l_G$ ist. Die andere Seitenlänge b dieser rechteckigen Vergleichsfläche A_V kann bezogen auf l_G als dimensionsloser Kennwert

$$K_{BR} = b/l_G$$

für den Bauraum genutzt werden.

Abb. 4 zeigt die rechteckige Arbeitsfläche $A_R = A_V$ eines viergliedrigen Mechanismus, bei dem zur Erzeugung einer Geradföhrung GF der Länge $l_G = 100$ [mm] die Kurbel A_0A um den zugeordneten Winkel φ_G wechselfinnig zu bewegen ist.

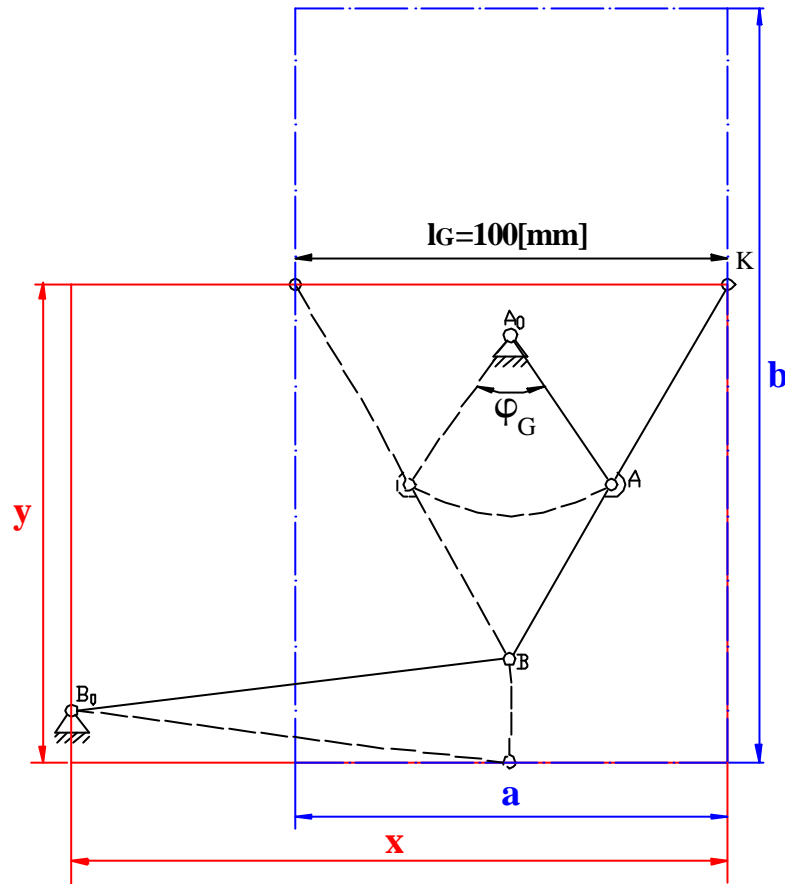


Abb. 4: Definition des Bauraumes

3. Mechanismen für Punktgeradführungen

In den folgenden Tabellen 1 bis 3 wird eine systematische Zusammenstellung der möglichen Koppelmechanismen zur Erzeugung angenäherter und exakter Punktgeradföhrungen gegeben. Dabei enthalten die einzelnen Spalten Angaben über

- die allgemeine Bezeichnung des Getriebes
- weitere in der Fachliteratur anzutreffende Benennungen oder Namen
- wichtige Literaturstellen zur Synthese
- prinzipielle Verfahren der Dimensionierung (zeichnerisch, rechnerisch, Kurventafeln)
- Charakteristika zur Beschreibung der Geradföhrung und zur Möglichkeit der Einbeziehung der gewünschten Geradföhrungslänge l_G in die Dimensionierung

- die erreichbare Bahngenauigkeit bzw. -abweichung Δy von der idealen Geraden und den erforderlichen Bauraum in Form des dimensionslosen Kennwertes K_{BR} sowie
- das Getriebeschema mit Kennzeichnung des Antriebsgliedes und des geradgeführten Koppelpunktes.

Die Tabelle 1 enthält wichtige viergliedrige Koppelmechanismen mit Dreh- und Schubgelenken für Punktgeradführungen.

In Tabelle 2 werden die wichtigsten viergliedrigen Mechanismen mit Drehgelenken (die sog. Lenkergeradführungen) erfasst.

Mehrgliedrige Koppelgetriebe (mit mehr als vier Gliedern) können besser als viergliedrige Koppelgetriebe vorgegebene Koppelpunktbahnen erfüllen. Mit ihnen ist z. B. auch die Erzeugung von exakten Geradführungen (Tabelle 3) möglich.

Die vorliegenden Tabellen liefern Hinweise, welche Verfahren zur Synthese von Punktgeradführungsgetrieben in Betracht kommen und welche Kennwerte von besonderer Bedeutung sind. In vielen Fällen kann jedoch kein eindeutig bestes Lösungsprinzip bzw. Syntheseverfahren angegeben werden. Die systematische Zusammenstellung ermöglicht aber eine erste Bewertung bzw. Auswahl und schafft damit auch eine wesentliche Voraussetzung für die Lösung geforderter Geradführungsaufgaben und die Optimierung von Getrieben.

Allgemein ist bekannt, dass eine hohe Bahngenauigkeit mit einem großen Bauraum und umgekehrt ein kleinerer Bauraum mit einer größeren Bahnabweichung verbunden ist. Infolge dieser gegensätzlichen Tendenz der beiden Zielgrößen lässt sich die optimale Lösung immer nur als ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Bauraum in Abhängigkeit von den Forderungen und Platzverhältnissen der jeweiligen Bewegungsaufgabe finden.

Die gegebenen Kennwerte in den Tabellen sind mit den Programmen APPROX und SAM ermittelt worden. Im praktischen Einsatz ist zu beachten, dass unvermeidbare Einflüsse, wie Herstellungsfehler, Gelenkspiel, Reibung, elastische Deformationen der Getriebeglieder etc. besonders bei mehrgliedrigen Koppelgetrieben, zu einer Differenz zwischen Ist- und Sollkennwert der synthetisierten Getriebe führen werden.

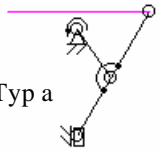
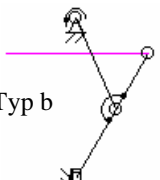
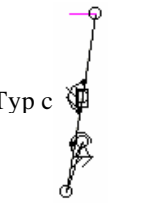
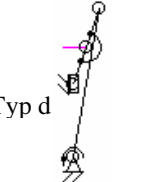
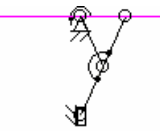
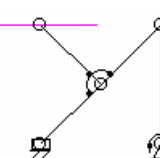
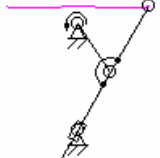
| Allgemeine Benennung des Getriebes | Andere Namen | Literaturstellen | Verfahren der Ermittlung | Beschreibung der Geradföhrung | Abweichung Δy [mm] Bauraum K_{BR} | Getriebschema |
|--|--|---|---|--|--|---|
| zentrische Schubkurbel | Lenker- GF Ellipsenlenker Evanssche GF | [Vol87] S.500 [Vol79] S.323 [Mod95] S.213 [Gie93] S.72 [Lic79] S.256 [Kra75] S.162 [Jah55] S.279 [Bey53] S.172 | zeichnerisch, rechnerisch und mittels Kurventafel | symmetrische, angenäherte Geradföhrung (GF) mit Vorgabe der Geradföhrungslänge l_G | $\Delta y = 0,04$ $K_{BR} = 1$ | Typ a  |
| | | | | | $\Delta y = 0,04$ $K_{BR} = 1,2488$ | Typ b  |
| | | | | | $\Delta y = 0,04$ $K_{BR} = 7,2836$ | Typ c  |
| | | | | | $\Delta y = 0,04$ $K_{BR} = 12,925$ | Typ d  |
| zentrische gleichschenklige Schubkurbel | Genauer Ellipsenlenker | [Vol92] S.189 [Kra75] S.160 [Hai61] S.263 [Jah55] S.278 | Sonderabmessungen | exakte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,0$ $K_{BR} = 0,5$ |  |
| Geradschub-Kurbelgetriebe | | [Kra75] S.139 | zeichnerisch | angenäherte GF ohne Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,8541$ $K_{BR} = 2,1229$ |  |
| zentrische schwingende Kurbelschleife | Konchoiden-Lenker | [Jah55] S.284 [Hai61] S.261 | zeichnerisch und rechnerisch | symmetrische, angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 1,3061$ $K_{BR} = 1$ |  |

Tabelle 1: Viergliedrige Koppelmechanismen mit Dreh- und Schubgelenken für die Geradföhrung (GF) eines Punktes

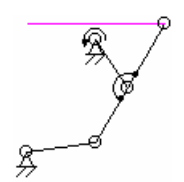
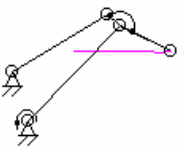
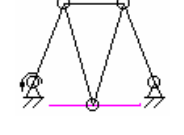
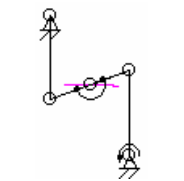
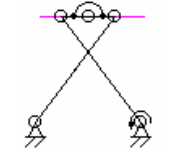
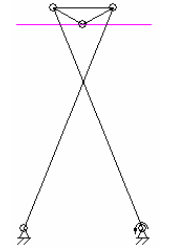
| Allgemeine Benennung des Getriebes | Andere Namen | Literaturstellen | Verfahren der Ermittlung | Beschreibung der Geradführung | Abweichung Δy [mm] Bauraum K_{BR} | Getriebeschema |
|--|--|---|--|--|--|---|
| Doppelschwinge | Evans- Lenker | [Vol79] S.321 [Gie93] S.72 [Wun70]S.81 [Kra55] S.176 | zeichnerisch und rechnerisch | angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,2966$ $K_{BR} = 1,0028$ |  |
| | Ellipsenlenker | [Jah55] S.279 [Vol87] S.499 | | | | |
| | Wippkranmechanismus | [Vol79] S.314 [Lic79] S.127 [Mod95]S.209 [Gie93] S.65 [Kra55] S.107 | zeichnerisch | angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,0270$ $K_{BR} = 4,2593$ |  |
| symmetrische Doppelschwinge | Robertsscher Lenker | [Vol79] S.316 [Gie93] S.101 [Kra56] S.101 [Jah55] S.282 [Hai61] S.263 [Wun70] S.81 | zeichnerisch, rechnerisch und mittels Kurventafeln | symmetrische, angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,0071$ $K_{BR} = 2,5847$ |  |
| | Wattscher Lenker | [VDI02] S.32 [Vol79] S.321 [Kra75] S.139 [Kra55] S.176 | zeichnerisch, rechnerisch und mittels Kurventafeln | symmetrische, angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,0532$ $K_{BR} = 4,6178$ |  |
| | Lemniskoidenlenker | [Bey53] S.172 [Jah55] S.283 [Hai61] S.263 | | | | |
| gekreuzte symmetrische Doppelschwinge | Lenker- GF nach Tschebyschev (Kreuzlenker) | [Jah55] S.282 [Hai61] S.261 [Bey53] S.172 [Wun70]S.81 | zeichnerisch, rechnerisch mit Sonderabmessungen | symmetrische, angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,22$ $K_{BR} = 1,2483$ |  |
| | Zykloidenlenker | [Mey56]S.510 | | | $\Delta y = 0,0177$ $K_{BR} = 2,4463$ |  |

Tabelle 2a: Viergliedrige Koppelmechanismen mit Drehgelenken für die Geradführung (GF) eines Punktes (Doppelschwinge)

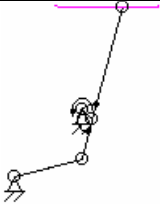
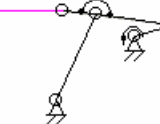
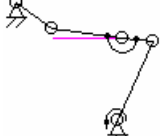
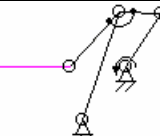
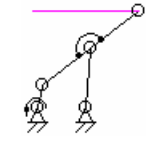
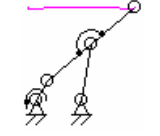
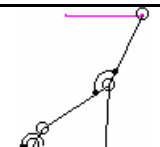
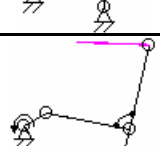
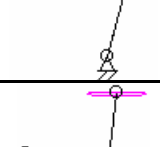
| Allgemeine Benennung des Getriebes | Andere Namen | Literaturstellen | Verfahren der Ermittlung | Beschreibung der Geradföhrung | Abweichung Δy [mm] Bauraum K_{BR} | Getriebschema |
|--|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--|--|---|
| Kurbelschwinge | Lenkergeradföhrung nach Müller | [Lic79] S.124 | zeichnerisch | angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 1,4374$ $K_{BR} = 2,2710$ |  |
| | Lemniskatenlenker | [Lic79] S.123 [Lic52] S.71 | zeichnerisch | angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 1,665$ $K_{BR} = 2,5856$ |  |
| | | | | | $\Delta y = 0,7054$ $K_{BR} = 3,9284$ |  |
| | Lenkergeradföhrung nach Lichtenheldt | [Lic79] S.127 [Mod95] S.209 | zeichnerisch | angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,5844$ $K_{BR} = 4,7419$ |  |
| gleichschenklige Kurbelschwinge | GF nach Hoecken | [Jah55] S.280 [Hai61] S.261 | Sonderabmessungen | symmetrische, angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,22$ $K_{BR} = 1,3281$ |  |
| | GF von Tschebyschev | [Wun70] S.81 | | | | |
| | GF mit 4-punktig berührender Tangente | [VDI02] S.38 | Sonderabmessungen | symmetrische, angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 1,0208$ $K_{BR} = 1,1904$ |  |
| | GF mit 6-punktig berührender Tangente | [VDI02] S.36 | Sonderabmessungen | symmetrische, angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 1,8212$ $K_{BR} = 3,176$ |  |
| | Geschlossene GF | [Vol79] S.321 | Kurventafel | symmetrische, angenäherte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 1,9172$ $K_{BR} = 3,1364$ |  |
| | Parallel- GF | [Kra56] S.114 | rechnerisch | symmetrische GF mit zwei parallelen Geraden ohne Vorgabe von l_G | $\Delta y = 4,276$ $K_{BR} = 4,8916$ |  |

Tabelle 2b: Viergliedrige Koppelmechanismen mit Drehgelenken für die Geradföhrung (GF) eines Punktes (Kurbelschwingen)

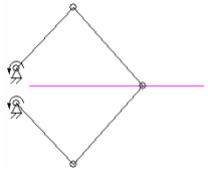
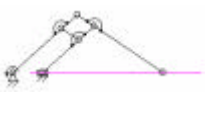

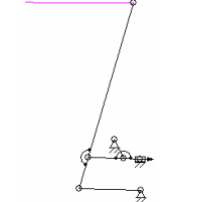
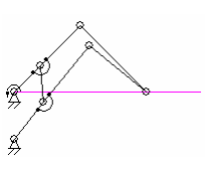
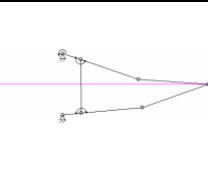
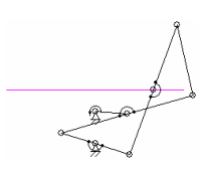
| Allgemeine Benennung des Getriebes | Andere Namen | Literaturstellen | Verfahren der Ermittlung | Beschreibung der Geradföhrung | Abweichung Δy [mm] Bauraum K_{BR} | Getriebeschema |
|--------------------------------------|---|--|------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| Fünfgliedriges Koppelgetriebe | GF von Römer oder Cartwright | [Vol79] S.313 [Jah55] S.226 | zeichnerisch und rechnerisch | exakte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,0$ $K_{BR} = 1,5573$ |  |
| Sechsgliedrige Koppelgetriebe | Storch-schnabel | [Kra75] S.110 [Kra55] S.95 | zeichnerisch und rechnerisch | exakte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,0$ $K_{BR} = 0,8$ |  |
| | | | | | $\Delta x = 0,0$ $K_{BR} = 1,193$ |  |
| | Indikator-schreib-gestänge | [Kra75] S.120 | zeichnerisch und rechnerisch | angenäherte GF ohne Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,4064$ $K_{BR} = 1,9356$ |  |
| | Exakte Geradföhrung von Hart | [Vol79] S.313 [Hai61] S.264 [Wun70] S.130 | rechnerisch mit Sonder-abmessungen | exakte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,0$ $K_{BR} = 0,75$ |  |
| | Exakte Geradföhrung aus einer Arbeit von Hain | [Hai61] S.264 | rechnerisch mit Sonder-abmessungen | exakte GF ohne Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,0$ $K_{BR} = 0,7044$ |  |
| | Inversor von Hart | [Vol79] S.313 [Hai61] S.263 [Wun70] S.132 [Bey53] S.168 | rechnerisch mit Sonder-abmessungen | exakte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,0$ $K_{BR} = 1,4951$ |  |

Tabelle 3a: Koppelgetriebe mit mehr als vier Glieder für die Geradföhrung eines Punktes

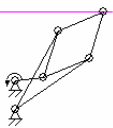
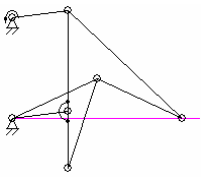
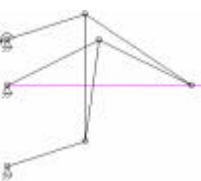
| Allgemeine Benennung des Getriebes | Andere Namen | Literaturstellen | Verfahren der Ermittlung | Beschreibung der Geradföhrung | Abweichung Δy [mm] Bauraum K_{BR} | Getriebschema |
|-------------------------------------|--|---|-----------------------------------|---------------------------------|--|---|
| Achtgliedrige Koppelgetriebe | Inversor von Peaucellier | [Vol87] S.499 [Vol79] S.313 [Bey53] S.169 [Gie93] S.94 | rechnerisch mit Sonderabmessungen | exakte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,0$ $K_{BR} = 0,5$ |  |
| | Exakte Geradföhrung von KEMPE | [Wun70] S.95 | rechnerisch mit Sonderabmessungen | exakte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,0$ $K_{BR} = 1,2745$ |  |
| | Exakte Geradföhrung aus einer Arbeit von Beyer | [Bey53] S.166 [Hai61] S.264 | rechnerisch mit Sonderabmessungen | exakte GF mit Vorgabe von l_G | $\Delta y = 0,0$ $K_{BR} = 1,112$ |  |

Tabelle 3b: Koppelgetriebe mit mehr als vier Glieder für die Geradföhrung eines Punktes

4. Getriebeoptimierung von Geradföhrungsmechanismen

Die Auslegung ungleichförmig übersetzender Getriebe zur Lösung von anspruchsvollen Bewegungsaufgaben stellt hohe Anforderungen an den Entwickler, da sie zum einen eine besondere Fachkenntnis verlangt und es zum anderen meistens keine geschlossenen, expliziten Auslegungsverfahren gibt.

Aufgrund dieser Problematik ergibt sich zunehmend stärker das Bestreben, Rechenprogramme zur Modellierung sowie zur Analyse und Synthese von Koppelmechanismen einzusetzen. Getriebesynthese heißt Aufbau eines Getriebes aus bekannten Elementen für gegebene Forderungen unter Nutzung von bestimmten Dimensionierungsverfahren, von Nomogrammen oder auch von rein intuitiven Vorgaben und Festlegungen.

Das im Institut für Festkörpermechanik der TU Dresden entwickelte Programmsystem APPROX [Mod99] bietet dem Anwender umfassende Möglichkeiten zur kinematischen und kinetostatischen Analyse sowie zur approximativen (angenäherten) Synthese ebener mehrgliedriger Koppelgetriebe. Für die Synthese bzw. Optimierung von Getrieben mit dem

Programm APPROX muss man die festgeschriebenen und die variablen Eingabegrößen vorgeben.

Zur Eingabeoptimierung gehören die folgenden Entscheidungen bzw. Festlegungen:

- Synthesaufgabe: Man hat die Möglichkeit, mit APPROX Führungs- oder Übertragungsaufgaben zu optimieren. Für die Optimierung von Geradföhrungen legt man die Forderungen an die Föhrungsbahn fest.
- Komponenten des Variablenvektors $X[i]$: Für die Optimierung muss man die Parameter (Dimensionen), die das Programm wärend der Optimierung ändern darf, bestimmen. Als Freigabeparameter stehen hauptsächlich geometrische Größen des Koppelmechanismus zur Verfügung (z.B. Gliedlängen sowie Punktkoordinaten von Koppel-, Schwingen- und Gestellpunkten).

Danach sind die Randbedingungen für Komponenten des Variablenvektors $X[i]$ relativ willkürlich zu bestimmen.

- Forderungen an die Bahnkurve des geradgeföhrten Koppelpunktes K :
 - Anzahl der Getriebestellungen GST. (Die maximal berechenbare Anzahl von Getriebestellungen ist $GST = 100$).
 - Größen x_K und y_K (Bahnkoordinaten des Koppelpunktes K bezüglich eines festgelegten Koordinatensystems).
 - Größen w_x und w_y (Wichtungsfaktoren der x_K - und y_K -Koordinate).

Jetzt kann die eigentliche Optimierung beginnen, indem man die Schnittstelle zum Modul OPTIMA aufruft. Das Modul OPTIMA erlaubt die Lösung von Optimierungsaufgaben nach folgenden numerischen Verfahren (Optimierungsstrategien):

Nelder-Mead, Monte-Carlo, Gauß-Seidel, Hooke-Jeeves u. M.C.Quick.

Für die Synthese und Optimierung von Getrieben mit dem Programm APPROX benötigt man immer eine Startlösung.

Startlösungen findet man mit Hilfe:

- der bekannten in der Literatur beschriebenen Synthese- Verfahren (z.B. aus Tabellen 1-3)
- von Nomogrammen (z.B. in [Vol79, Mod95])
- eines Getriebe- Atlases (z.B. in [Hai73, Gün95])

- Man kann z.B. aus Abb. 5 einige Mechanismen mit geradlinigem Abschnitt ihrer Koppelpunktbahn (z.B. K_7 , K_8 , K_{23} . . .) als Startgetriebe für die Optimierung mit APPROX gewinnen.

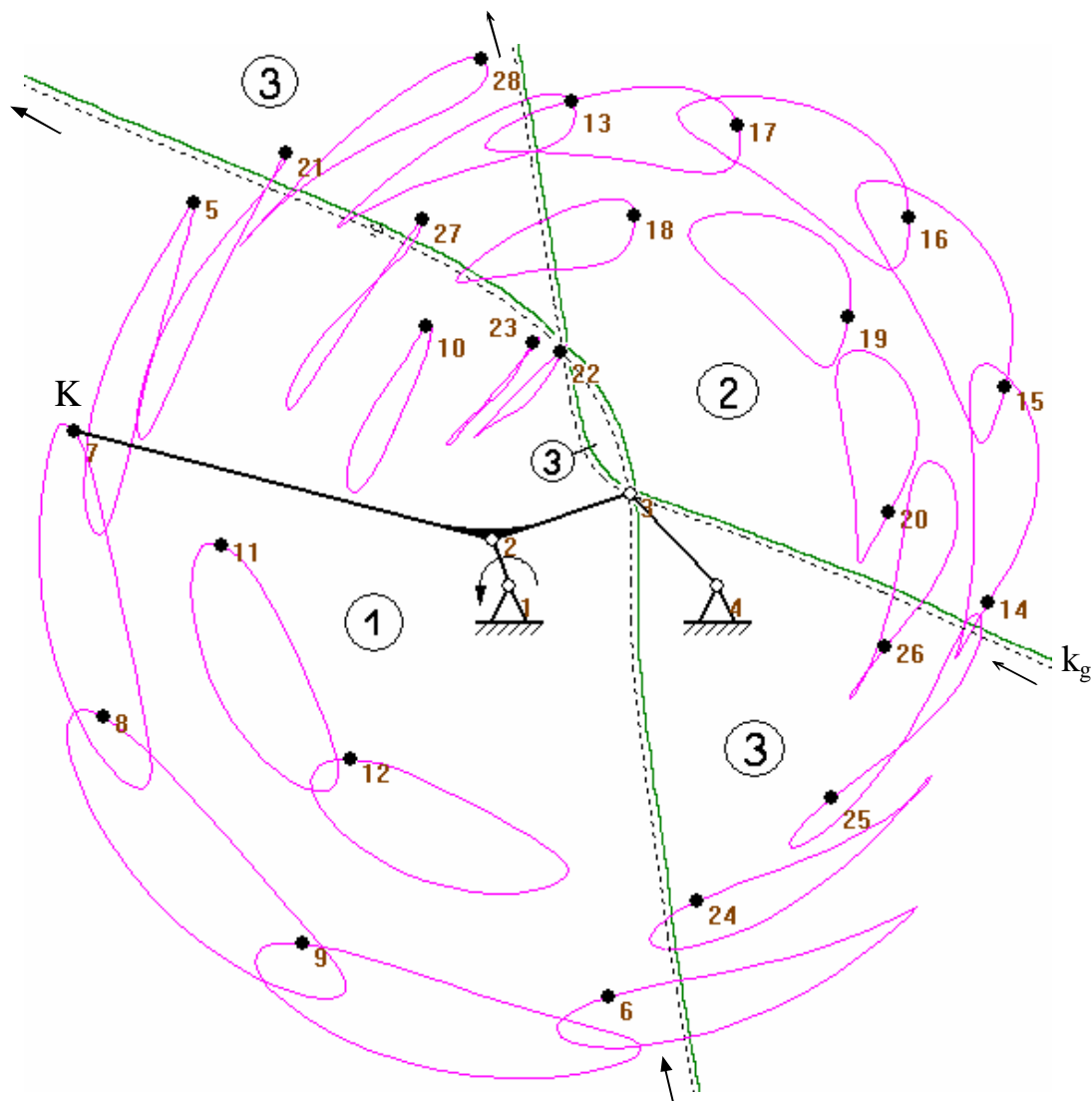


Abb. 5: Koppelpunktbahnen einer Kurbelschwinge

Die Koppelpunktbahnen eines jeden Feldes weisen die gleichen charakteristischen Merkmale auf, wie z.B. Durchlaufrichtung, Schnittpunkte, Spitzen, ein- oder mehrschleifige Bahnen ohne bzw. mit geradlinigem Anteil. Die einzelnen Bahnen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Eignung zur Punktgeradföhrung. Die Gebiete, in denen geeignete Koppelpunkte mit annähernd geradlinigen Bahnabschnitten liegen, sind von Getriebe zu Getriebe unterschiedlich.

Das jeweils ausgewählte Getriebe muss vor der Optimierung mit APPROX aufbereitet werden. Das bedeutet es muss gedreht, verschoben und skaliert werden, damit eine definierte Geradföhrungslänge gemäß den in diesem Beitrag festgelegten Forderungen entsteht (alle Geradföhrungen liegen horizontal und sollen eine Länge $l_G = 100$ [mm] haben).

Beispiele für die Nutzung von APPROX zur Optimierung:

Als erstes Beispiel wurde das sechsgliedrige Indikator- Schreibgetriebe nach Tab. 3a untersucht und in Abb. 6 dargestellt. Die Maße dieser Getriebe sind in Tabelle 4 aufgeföhrt.

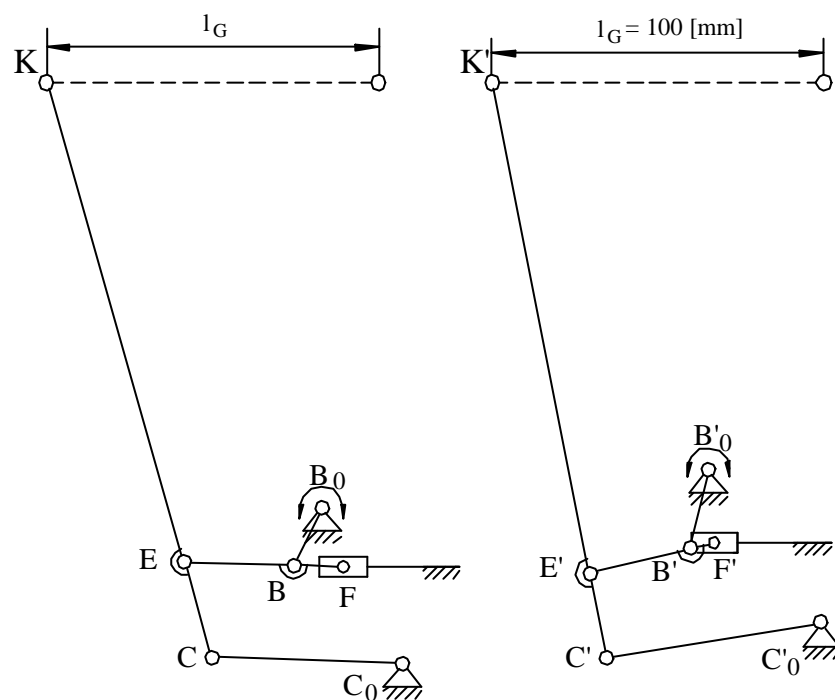


Abb. 6: Indikator- Schreibgetriebe zur Geradföhrung des Punktes K bzw. K'

1_ $C_0 C E F B B_0$ Ausgangsgetriebe ohne Optimierung

2_ $C'_0 C' E' F' B' B'_0$ optimiertes Getriebe

| Getriebe | $\overline{B_0 C_0}$ | $\overline{B_0 B}$ | $\overline{B F}$ | $\overline{F E}$ | $\overline{C_0 C}$ | $\overline{C E}$ | $\overline{C K}$ | D_y | K_{BR} |
|-------------------------|----------------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------|------------------|--------|----------|
| $C_0 C E F B B_0$ | 52,8250 | 19,2 | 15 | 48 | 57,6 | 30 | 180 | 0,4064 | 1,9356 |
| $C_0' C' E' F' B' B_0'$ | 57,4178 | 24,4017 | 7,2951 | 38,7055 | 65,5953 | 26,2862 | 176,7573 | 0,0016 | 1,7676 |

Tabelle 4: Abmessungen und Kennwerte der Getriebe nach Abb. 6

Die mit der Optimierung erreichte Verbesserung der Kennwerte ist offensichtlich.

Die Abb. 7 zeigt die Bahnverläufe des Indikator- Schreibgetriebes vor und nach der Optimierung für eine Geradföhrungslänge von $l_G = 100$ [mm].

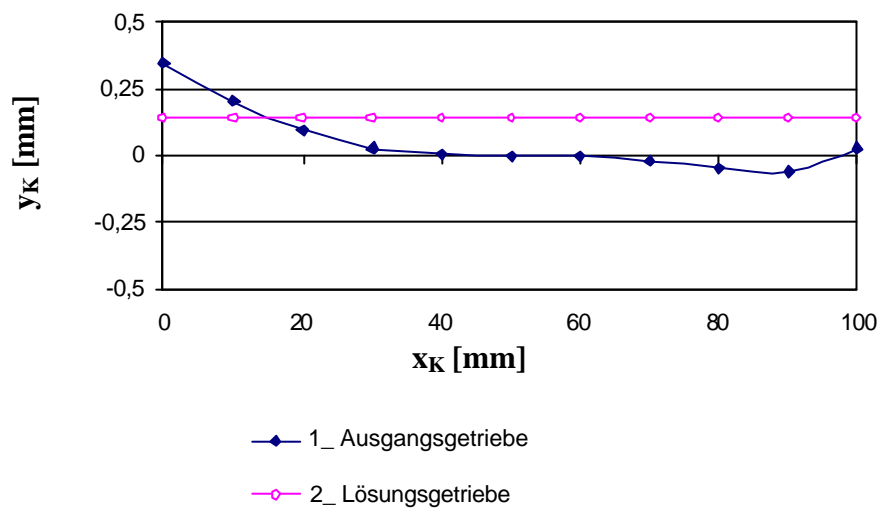


Abb. 7: Bahnverläufe des Indikator- Schreibgetriebes vor und nach der Optimierung

Als zweites Beispiel kann die Koppelpunktbahn K_{23} in Abb. 5 wegen der insgesamt kleinen Bahnabweichung D_y auch als Startlösung für die Optimierung mit APPROX zur Erzeugung einer geschlossenen Geradföhrung benutzt werden (Abb. 8).

Die Abb. 9 zeigt die Koppelpunktbahnen vor und nach der Optimierung für eine einheitliche Geradföhrungslänge von $l_G = 100$ [mm]. Die Maße dieser Getriebe sind in Tabelle 5 aufgeföhrt.

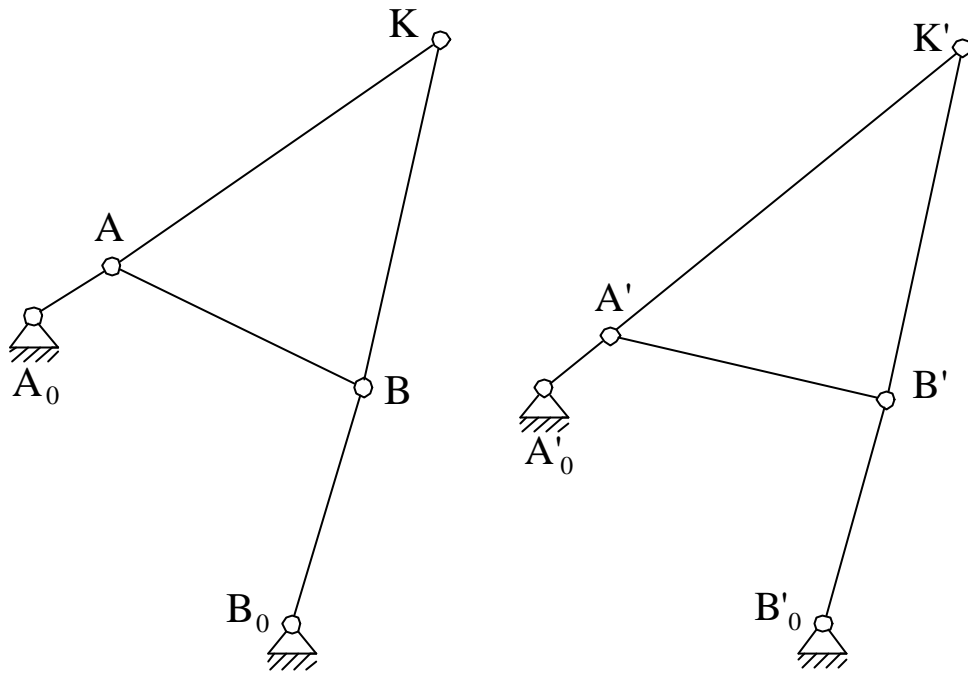


Abb. 8: Geradföhrungsgetriebe mit dem Koppelpunkt $K = K23$

1_ A_0ABB_0 Ausgangsgetriebe ohne Optimierung

2_ $A'_0A'B'B'_0$ optimiertes Getriebe

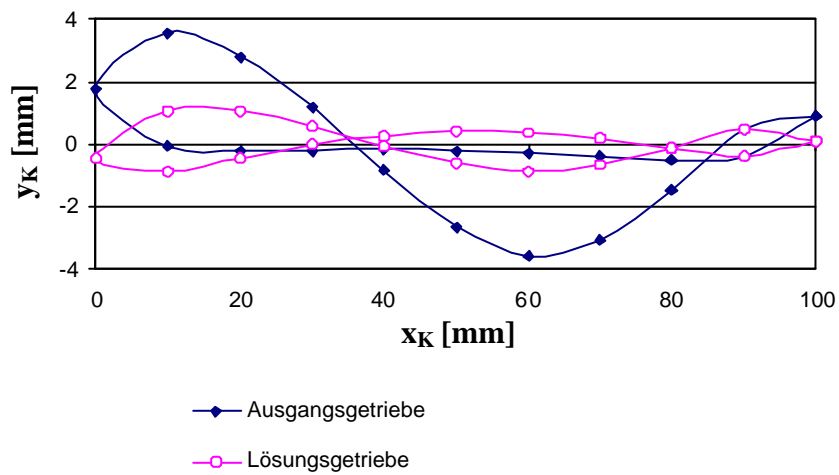


Abb. 9: Bahnverläufe der Getriebe mit geschlossener Geradföhrung vor und nach der Optimierung

| Getriebe | $\overline{A_0B_0}$ | $\overline{A_0A}$ | \overline{AB} | $\overline{B_0B}$ | \overline{AK} | \overline{BK} | D_y | K_{BR} |
|----------------|---------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------|----------|
| A_0ABB_0 | 144,0830 | 33,2500 | 99,7498 | 88,6666 | 142,7807 | 127,6876 | 7,1788 | 3,7939 |
| $A'_0A'B'B'_0$ | 131,0519 | 30,1474 | 100,0662 | 85,2056 | 163,3348 | 132,1434 | 2,1296 | 3,7815 |

Tabelle 5: Abmessungen und Kennwerte der Getriebe nach Abb. 8

Zusätzliche Lösungen sind möglich, wenn mit Hilfe des Satzes von Roberts/ Tschebyschev noch zwei weitere Vieregelkenke mit gleicher Koppelpunktbahn aber anderem Bauraum und Bewegungsverhalten ermittelt werden.

5. Getriebevariation mit Hilfe des Satzes von Roberts

Nach Roberts kann jede Koppelkurve eines viergliedrigen Koppelgetriebes mit vier Drehgelenken im Allgemeinen durch zwei weitere Vieregelkenkgetriebe erzeugt werden [VDI02, Mod95].

Damit die möglichen Getriebevarianten nicht auf dem beschriebenen grafischen Weg sondern rechnergestützt gewonnen werden können, wurde ein Programmmodul als Makro für das Programm AutoCAD 2000i entwickelt [Ros03].

Nach dem Laden des Makros „Ersatzgetriebe“ öffnet sich ein Dialogfenster (Abb. 10) zur Eingabe der Abmessungen eines möglichen Lösungsgetriebes. Nach ausgeführter Eingabe können die Abmessungen der beiden Ersatzgetriebe berechnet und auf dem Bildschirm dargestellt werden. In Abb. 11 sind das Ausgangsgetriebe $A_0A(K)BB_0$, sowie das erste und das zweite viergliedrige Ersatzgetriebe $A'_0A'(K)B'B'_0$ und $A''_0A''(K)B''B''_0$ zu sehen.

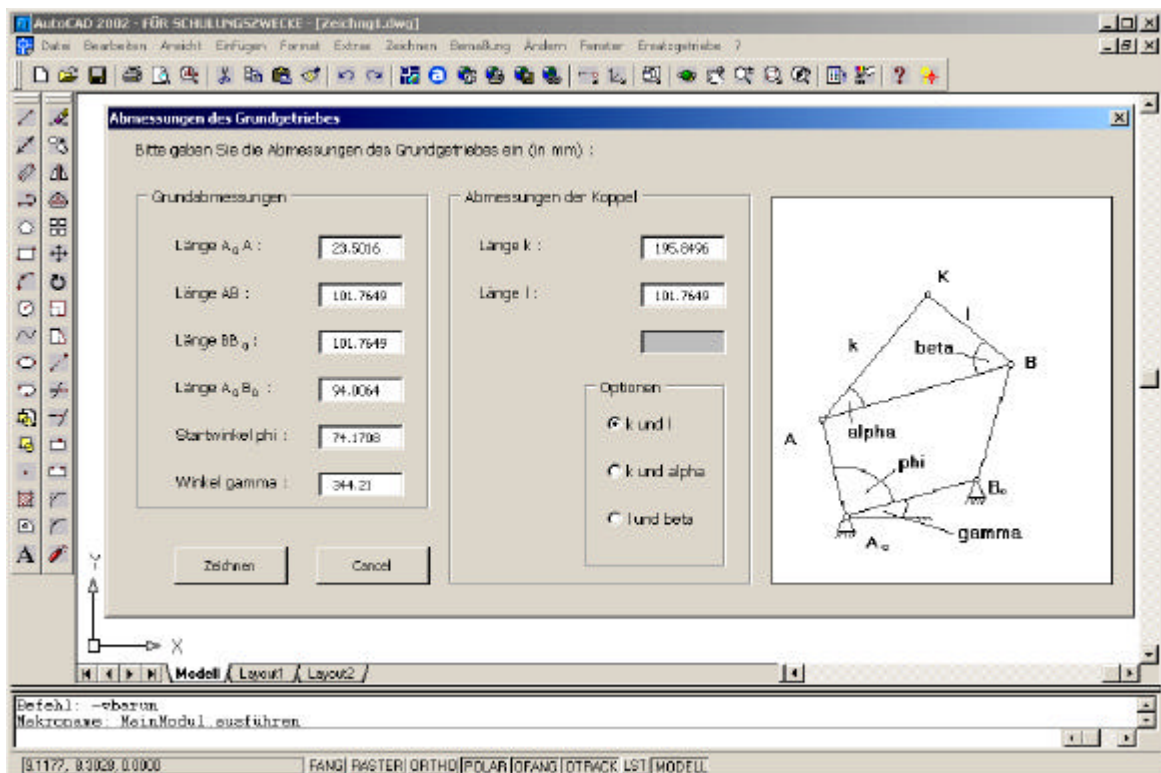


Abb. 10: Dialogfenster zur Eingabe der Abmessungen des Ausgangsgetriebes

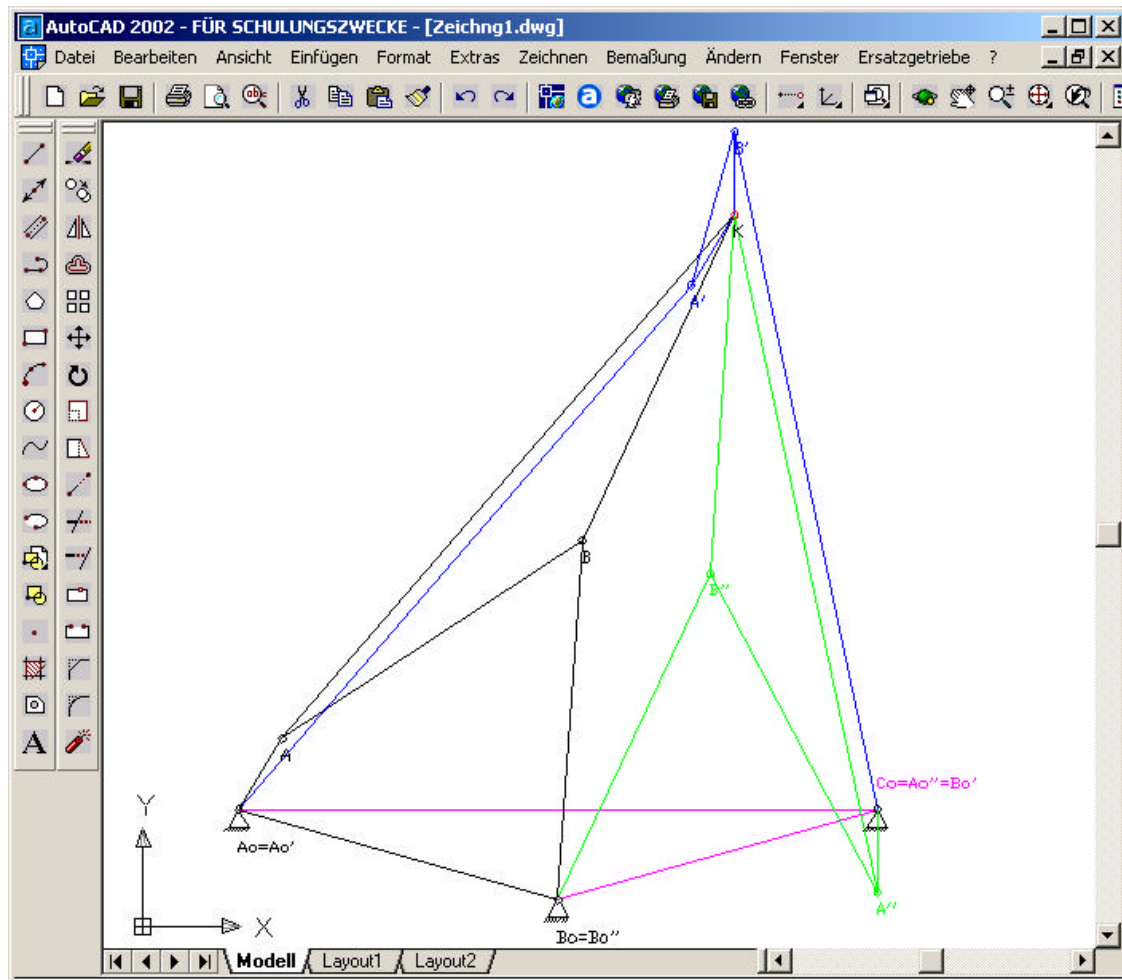


Abb. 11: Darstellung des Grundgetriebes $A_0A(K)BB_0$ und der beiden viergliedrigen Ersatzgetriebe

Die Eingabe der Getriebedaten eines viergliedrigen Koppelgetriebes gestattet die Berechnung aller Punkt- bzw. Ebenenführungsgetriebe und ihre Darstellung auf dem Bildschirm. Unter anderem können Gliedlängen und die Koordinaten der Gelenkpunkte auf dem Monitor angezeigt bzw. mittels Drucker ausgegeben werden. Weiterhin ist es möglich, die entstandenen Getriebe an ein Analyse- und Simulationsprogramm (z.B. SAM) als DXF- Format weiterzugeben. Das Programm ist einfach mit Hilfe von Menüs und Dialogen zu bedienen.

Die Verwendung des Satzes von Roberts in einfacher und erweiterter Form zur mehrfachen Erzeugung von getriebetechnischen Lösungen für Punktgeradfürungen durch vier- und fünfgliedrige Koppelgetriebe sowie Ebenengeradfürungen durch sechsgliedrige Mechanismen [VDI02] kann zweckmäßig für die Optimierung des Bauraums und des Bewegungsverhaltens (z.B. Durchlauffähigkeit, u.ä.) genutzt werden.

6. Schlussbemerkungen

Ein Ziel des vorliegenden Beitrages war es, eine möglichst vollständige Zusammenstellung und Ordnung aller bekannten ebenen Koppelmechanismen zur Erzeugung von Punktgeradföhrungen im Rahmen einer Lösungssammlung zu schaffen.

Bisher fehlte eine Bewertungsaussage für die unterschiedlichen Punktgeradföhrungsgetriebe. Deshalb war die Auswahl eines bestimmten Getriebeprinzips schwierig. In dem Beitrag werden erstmals quantitative Angaben zu den wichtigen Eigenschaften Bahnabweichung und Bauraum von Geradföhrungsgetrieben gemacht.

Viele in der Vergangenheit entwickelte Syntheseverfahren sind durch hohen Konstruktionsaufwand gekennzeichnet, so dass durch Aufstellen von Kurventafeln oder Einsatz von Rechentechnik, insbesondere auch von Optimierungsverfahren, brauchbare Lösungswege entwickelt wurden.

Die Entwicklung von Punktgeradföhrungsmechanismen ist heute ohne den Einsatz von Simulations- und Optimierungsprogrammen nicht mehr denkbar. Simulationssysteme sind das wichtigste Arbeitsmittel für das Lösen von Bewegungsaufgaben.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [Bey53] Beyer, R.: Kinematische Getriebesynthese. Berlin: Springer, 1953
- [Chr00] Christen, G.: Unterlagen der Lehrveranstaltung „Industrierobotertechnik“. TU Ilmenau, 2000
- [Chr95] Christen, G.; Buchheim, A.; Quast, V. : Computerunterstützte Auswahl ebener fünfgliedriger Koppelmechanismen für Führungsaufgaben. Proc. 9. IFToMM- World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milano, Vol. 1, 1995, S. 286-290
- [Fun94] Funk, W.: Rechnerunterstützte Synthese von Geradföhrungsgetrieben. Konstruktion 46 (1994), S. 365 – 370
- [Gie93] Gierse, F. J.; Günzel, D.; Schaeffer, T.: Untersuchungen und Klassifizierung von Maßsynthese- Verfahren für die Bestimmung der Kinematik ebener Führungsgelenkgetriebe. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 218, Düsseldorf: VDI- Verl., 1993
- [Gün95] Günzel, D.: Koppelkurvenatlas ebener viergliedriger Gelenkgetriebe. Aachen: Shaker, 1995
- [Hai61] Hain, K.: Angewandte Getriebelehre. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl., 1961
- [Hai73] Hain, K.: Getriebebeispiel- Atlas. Düsseldorf: VDI- Verl., 1973
- [Jah55] Jahr, W.; Knechtel, P.: Grundzüge der Getriebelehre. Bd. 1. Leipzig: Fachbuchverl., 1955
- [Kra55] Kraus, R.: Geradföhrungen durch das Gelenkviereck. Düsseldorf: Deutscher Ingenieur- Verl., 1955
- [Kra56] Kraus, R.: Getriebelehre- Maßbestimmung. Bd. III. Berlin: Verl. Technik, 1956
- [Kra75] Kraemer, O.: Getriebelehre. 6. Aufl. Karlsruhe: Braun, 1975
- [Lic52] Lichtenheldt, W.: Zur Konstruktion von Gelenkgetrieben. Wissenschaftlich Zeitschrift der TH Dresden. 1 (1951 / 52) Heft 1, S. 71-76
- [Lic79] Lichtenheldt, W.; Luck, K.: Konstruktionslehre der Getriebe. 5. Aufl. Berlin: Akademie- Verl., 1979

- [Mey56] Meyer zur Capellen, W: Der Zykloidenlenker und seine Weiterentwicklung Konstruktion 8 (1956) Heft 12
- [Mod95] Modler, K.-H.; Luck, K.: Getriebetechnik Analyse, Synthese, Optimierung. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1995
- [Mod99] Modler, K.-H.; Strauchmann, H.: APPROX- Interaktives grafisches Optimierungssystem für Koppelgetriebe. TU Dresden, Institut für Festkörper-mechanik, 1999
- [Ros03] Rose, S.: Dimensionierung von Führungsmechanismen. Projektarbeit TU Ilmenau, 2003 (Betreuer: Dipl. Ing. O. Wazan)
- [SAM01] SAM 4.2: Simulation und Analyse von Mechanismen. Netherlands: ARTAS- Engineering Software, 2001
- [VDI02] VDI-Richtlinie 2740, Blatt2: Mechanische Einrichtung in der Automatisierungs-technik, Führungsgetriebe. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf: VDI- Verl., 2002
- [Vol79] Volmer, J. (Hrsg.): Getriebetechnik– Koppelgetriebe. Berlin: Verl. Technik, 1979
- [Vol87] Volmer, J.(Hrsg.): Getriebetechnik - Lehrbuch. 5. Aufl. Berlin: Verl. Technik, 1987
- [Vol92] Volmer, J. (Hrsg.): Getriebetechnik - Grundlagen. Berlin: Verl. Technik, 1992
- [Wun68] Wunderlich, W: On Burmester's Focal Mechanism and Hart's Straight-line Motion. Jnl. Mechanisms 3 (1968), S. 79-86
- [Wun70] Wunderlich, W: Ebene Kinematik. Mannheim: Bibliographisches Institut, 1970

Autor:

Dipl. – Ing. Ousama Wazan

Technische Universität Ilmenau, PF 10 05 65

98684 Ilmenau

Tel. :03677/691810

E- mail: ousama.wazan@TU-Ilmenau.DE